

# 2017

## X Reunión Española de Optoelectrónica



Santiago de Compostela

12-14 Julio de 2017

## **EDITADO POR:**

Justo Arines Piferrer

Manuel Blanco Fraga

María Teresa Flores Arias

María del Carmen Bao-Varela

María de la Inmaculada Aymerich López

### **Publicado por:**

Asociación Científica de Óptica y Fotónica de Santiago

ISBN: 978-84-16989-81-2

ISBN 978-84-16989-81-2



# Láser de fibra en anillo trabajando en régimen SLM como fuente óptica de un sistema BOTDA

**Fiber ring laser working on the SLM regime as an optical source of a BOTDA system.**

Rubén RUIZ-LOMBERA <sup>(1)</sup>, Luis RODRIGUEZ-COBO <sup>(1,2,3)</sup>, Rosa Ana PÉREZ-HERRERA <sup>(4)</sup>, Pablo ROLDÁN-VARONA <sup>(1)</sup>, Jesús MIRAPEIX <sup>(1,2,3)</sup>, José Miguel LÓPEZ-HIGUERA <sup>(1,2,3)</sup>

1. Grupo de Ingeniería Fotónica, Universidad de Cantabria, Santander, España.
2. Centro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN), Cantabria, España.
3. Instituto de Investigación Sanitaria Valdecilla (IDIVAL), Cantabria, España.
4. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Publica de Navarra, Pamplona España.

Persona de contacto: Rubén Ruiz-Lombera ([ruben.ruiz@unican.es](mailto:ruben.ruiz@unican.es)).

## RESUMEN:

En este artículo se propone el uso de un láser en anillo con fibra dopada con erbio, en particular trabajando en régimen de modo longitudinal único, como fuente óptica de un sensor de Brillouin en el dominio del tiempo. Se ha analizado el rendimiento que presenta un sistema BOTDA empleando la fuente diseñada y comparándolo con un láser comercial de telecomunicaciones. Además, se han medido y analizado algunos parámetros clave de la estructura empleada consiguiendo un punto de trabajo muy estable.

**Palabras clave:** BOTDA, dispersión estimulada de Brillouin, sensores distribuidos, láser en anillo, régimen SLM.

## ABSTRACT:

We present in this paper the employment of an Erbium Fiber Ring Laser structure working on the Single Longitudinal Mode regime as an optical source of a Brillouin optical time domain sensor. A study of the associated performance of the BOTDA system employing the ring fiber is analyzed and compared with the performance of the sensor if a commercial laser is chosen. Moreover, some key parameters of the ring laser have been measured and analyzed, proving that a very stable operation is achieved.

**Key words:** BOTDA, stimulated Brillouin scattering, distributed sensors, ring laser, SLM regime.

## 1.- Introducción

Durante los últimos años, los sistemas distribuidos basados en procesos dispersión se han convertido en un área de gran interés dentro del campo de los sensores de fibra óptica. Este tipo de sensores han experimentado un gran avance, apareciendo nuevas propuestas y soluciones basados en diferentes fenómenos.

Entre ellas se encuentran las soluciones basadas en la dispersión Brillouin, tanto los que emplean la dispersión espontánea, como los que usan la estimulada. Dentro de este último grupo destacan los sensores de Brillouin basados en el dominio del tiempo (*BOTDA, Brillouin Optical Time Domain Analysis*). Se trata de la tipología más empleada debido a su capacidad para medir tanto la temperatura

como la deformación de manera distribuida a lo largo de una fibra óptica usando montajes experimentales menos complejos que otras soluciones alternativas, como son las basadas en el análisis de la frecuencia o de la correlación (BOFDA y BOCDA, respectivamente).

Durante los últimos años, muchos esfuerzos se han centrado en conseguir mejorar las prestaciones y el rendimiento de los sensores BOTDA, especialmente con contribuciones en diferentes áreas, como puede ser el aumento de la longitud de medida, mediante la amplificación Raman [1], mejorar la resolución espacial [2], o evitar efectos adversos de estos sistemas como son el agotamiento del bombeo o los efectos no locales en la fibra que producen una distorsión en la señal medida, produciendo que aumente el error cometido al estimar el desplazamiento de la frecuencia de Brillouin de la fibra (*BFS*, *Brillouin Frequency Shift*) [3]. Con el objetivo de poder comparar el rendimiento de los diferentes sensores que van apareciendo en la literatura, ha surgido el concepto de figura de mérito (*FoM*, *Figure-of-merit*) [4], donde se tienen en cuenta factores como la anchura del espectro de ganancia o el promediado utilizado para relacionarlo con la incertidumbre en la estimación de la frecuencia de Brillouin. Por otra parte, otros autores también han analizado qué impacto tienen las diferentes fuentes de ruido que existen en los sensores BOTDA [5], concluyendo que los efectos que más influyen son el ruido inducido por la doble dispersión de Rayleigh que genera la onda de prueba en sistemas de larga distancia, y el ruido producido por la conversión de fase a intensidad cuando se produce el efecto de la dispersión estimulada de Brillouin en sistemas de corta distancia. Relacionado con las fuentes de ruido, han aparecido contribuciones donde se analizan cómo afecta la anchura del láser en el ruido del sistema para diferentes longitudes de fibra y duraciones de los pulsos de bombeo [6].

Dentro de este ámbito, y como alternativa al uso generalizado de un láser comercial, en este trabajo se ha propuesto el diseño y utilización de una estructura de láser en anillo con fibra dopada con erbio (*EFRL*, *Erbium Fiber Ring Laser*) trabajando en régimen de modo longitudinal único (*SLM*, *Single Longitudinal Mode*) como única fuente óptica del sistema

BOTDA. Se han analizado algunos de los parámetros más importantes de la estructura láser propuesta, determinando que no aparecen algunos de los problemas más típicos de las estructuras en anillo como es el caso del comportamiento multimodo o de las inestabilidades en longitud de onda o potencia. Al tratarse de un láser en anillo basado en una red de difracción de Bragg (*FBG*, *Fiber Bragg Grating*), presenta algunas de las ventajas de éstos, como son la capacidad de sintonización dentro de un amplio rango espectral y que presenta un ancho de línea muy estrecho, lo que puede resultar de interés en sistemas BOTDA.

## 2.- Montaje experimental

Para realizar la implementación de la estructura láser en anillo con fibra dopada con erbio se ha utilizado la fibra dopada con erbio comercial I25 de Fibercore. Además, se ha utilizado una red de difracción de Bragg en fibra como filtro, de manera que la señal se hace pasar a través de una fibra dopada con erbio que no se bombea, actuando como un absorbente saturado, estrechando la respuesta del FBG debido a la variación periódica del índice de refracción debido al fenómeno conocido como *SHB* (*Spatial Hole Burning*) [7], consiguiendo de esa manera que el anillo trabaje en régimen de modo longitudinal único.

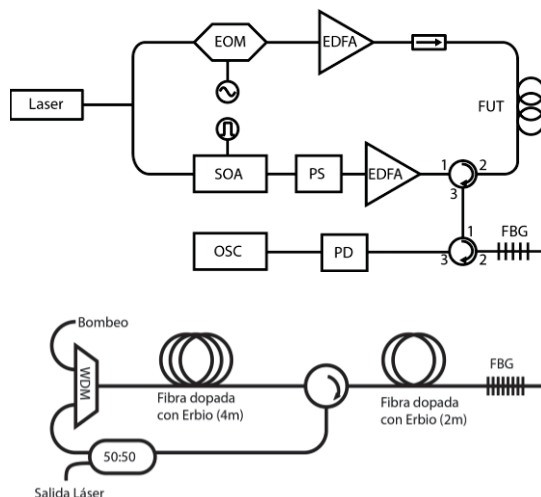


Fig. 1: Montajes experimentales. a) Sensor BOTDA. b) Configuración del láser en anillo empleada.

Para poder validar el correcto funcionamiento del láser en anillo implementado como fuente de un sensor distribuido de Brillouin, se ha

procedido a la realización de unas medidas experimentales sobre un esquema BOTDA convencional. La fuente óptica, tanto si se usa el láser comercial como si se emplea la estructura en anillo, emite en 1550nm y se divide en dos caminos ópticos, la señal de prueba y el bombeo. La señal de prueba se modula mediante el empleo de un modulador electro-óptico y un generador de radiofrecuencia en torno a los 11 GHz y se inyecta en la fibra de medida. Por otra parte, en la rama del bombeo se emplea un SOA (*Semiconductor Optical Amplifier*) para generar una señal pulsada. Para la realización de las medidas se emplean pulsos de 20ns, que dan lugar a una resolución espacial de 2m. Los pulsos se amplifican con un amplificador de erbio y pasan por un aleatorizador de polarización para evitar los efectos que tiene la polarización sobre la ganancia de Brillouin y se circula hasta la fibra de medida. Por último, se encuentra la parte de filtrado y detección. Mediante una red de difracción de Bragg se filtra una de las dos bandas laterales de la prueba y se circula la otra hacia un detector de 125 MHz conectado a una tarjeta adquisidora. La señal capturada se promedia 4096 veces para mejorar la SNR (*signal-to-noise ratio*) y evitar los efectos de la polarización en la ganancia de Brillouin.

### 3.- Resultados experimentales

Con el propósito de verificar el comportamiento en régimen SLM del láser en anillo se han medido algunos de los parámetros más importantes de estos láseres en el espectro óptico, estudiando la anchura del espectro y la estabilidad en longitud de onda. Los resultados se han comparado con los que se obtienen empleando un láser de diodo DFB comercial de la marca EMCORE. Ambos láseres se encuentran trabajando en tercera ventana en torno a 1550nm.

En la Figura 2 se representan ambos espectros, utilizando un BOSA (*Brillouin Optical Spectrum Analyzer*) para hacer las medidas ya que posee una resolución de 0.0082 pm. También se ha utilizado un atenuador a la salida de los láseres para que ambos trabajen a una potencia en torno a los 0dBm, permitiendo una comparación más clara. En la Figura 2 (a) se puede observar como la respuesta espectral

del láser ERFL (línea roja) es algo más estrecha que la del láser comercial (línea azul). Por otra parte, en la Figura 2 (b) se muestra la estabilidad en longitud de onda de ambos láseres, mostrando un comportamiento similar en torno a  $\pm 1$  pm de fluctuación con respecto a la longitud de onda central.

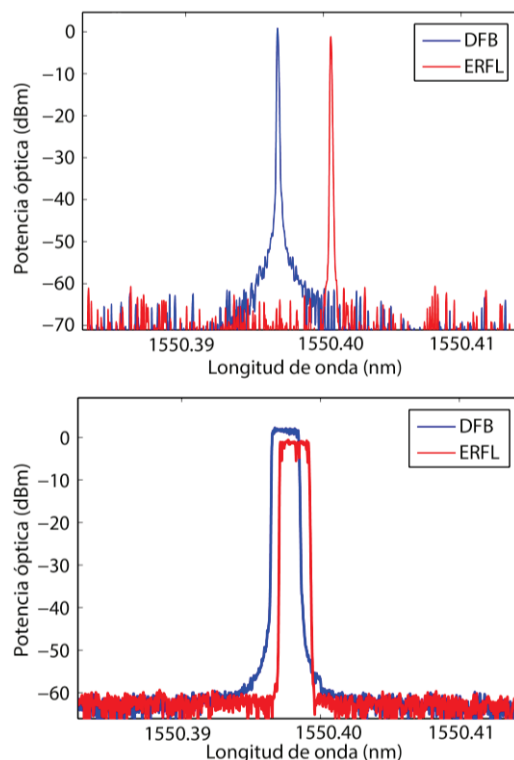


Fig. 2: Comparativa de espectros. a) Espectro de salida del ERFL (línea roja) y láser DFB (línea azul). b) Estabilidad en longitud de onda para el láser ERFL (línea roja) y el DFB (línea azul).

Tras analizar estos resultados, se determina que el láser empleado puede ser susceptible de emplearse en un sistema BOTDA, ya que tiene una buena estabilidad, aspecto fundamental en estos sistemas debido a la etapa de filtrado que presentan, y además se trata de una fuente muy estrecha, lo que está directamente relacionado con el ruido del sensor. Para corroborar esta hipótesis, se han realizado medidas distribuidas a lo largo de una fibra de 21km que se representan en la Figura 3. Los metros finales de la fibra se han introducido en un horno a 50°C, y como se esperaba y se puede ver en la Figura 3, el sensor BOTDA es capaz de medir correctamente dicha temperatura, con resultados muy similares



tanto si se mide empleando el láser DFB como si se emplea la estructura en anillo.

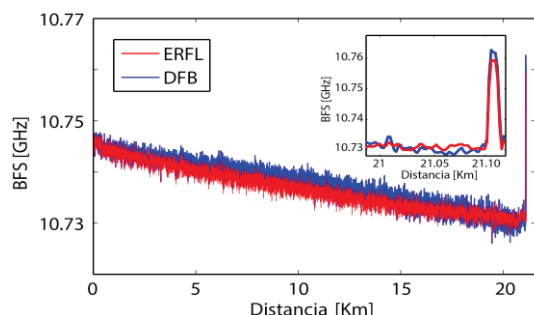


Fig. 3: Medida distribuida del sensor BOTDA. Estimación de la BFS.

Como muestra la Figura 3, tras realizar el ajuste Lorentziano a los datos medidos, existe una diferencia en torno a los 30 MHz que serían equivalentes a los 30°C de diferencia entre la zona de la fibra que se encuentra a temperatura ambiente y la fibra que está en el horno. Esta última figura demuestra la viabilidad de emplear este tipo de estructura láser en anillo como fuente de un sistema distribuido BOTDA.

#### 4.- Conclusión

En este trabajo se ha estudiado y verificado la posibilidad de emplear como fuente láser de un sistema BOTDA una estructura de láser en anillo de fibra dopada con erbio trabajando en régimen de modo longitudinal único. Para comprobar la validez de la estructura láser propuesta, se han medido varios de sus parámetros más importantes como son el espectro óptico, para comprobar su anchura, y la estabilidad en longitud de onda. Los resultados obtenidos se han comparado con los resultados derivados de emplear un láser comercial de telecomunicaciones. Una vez comprobado un rendimiento similar entre ambos láseres se ha procedido a utilizar dicha estructura en un sensor distribuido basado en la dispersión Brillouin. Para ello se han realizado medidas distribuidas a lo largo de una fibra óptica de 21 km sobre la cual se genera un punto caliente en los metros finales a una temperatura de 50°C. Los resultados obtenidos se han comparado con los resultados que se obtienen al emplear el láser comercial y han demostrado un rendimiento similar entre ambos, verificando la viabilidad de emplear este tipo de estructuras en anillo en sistemas distribuidos. Entre

otras posibles ventajas, la estructura presentada posee la capacidad de que la longitud de onda de trabajo se puede ajustar dentro de un rango espectral bastante ancho debido a las características de la red de difracción de Bragg empleada. Además, en futuros trabajos se trabajará en comprobar si un menor ancho de línea de este tipo de láser puede afectar positivamente en el ruido del sistema.

**Agradecimientos:** Este trabajo ha sido cofinanciado por los proyectos TEC2013-47264-C2-1-R, TEC2016-76021-C2-2-R (AEI/FEDER, UE) y por la beca Postdoctoral del parlamento de Cantabria.

#### Referencias

- [1] X. ANGULO-VINUESA, S. MARTIN-LOPEZ, J. NUÑO, P. CORREDERA, J.D. ANIA-CASTAÑON, L. THÉVENAZ, and M. GONZÁLEZ-HERRÁEZ, "Raman-assisted Brillouin distributed temperature sensor over 100 km featuring 2 m resolution and 1.2 C uncertainty," *Journal of Lightwave Technology*, 30(8), 1060-1065 (2012).
- [2] W. LI, X. BAO, Y. LI, and L. CHEN, "Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing," *Optics express*, 16(26), 21616-21625 (2008).
- [3] R. RUIZ-LOMBERA, J. URRICELQUI, M. SAGUES, J. MIRAPEIX, J.M. LOPEZ-HIGUERA, and A. LOAYSSA, "Overcoming nonlocal effects and Brillouin threshold limitations in Brillouin optical time-domain sensors". *IEEE Photonics Journal*, 7(6), 1-9, (2015).
- [4] M.A. SOTO, and L. THÉVENAZ, "Modeling and evaluating the performance of Brillouin distributed optical fiber sensors," *Optics express*, 21(25), 31347-31366 (2013).
- [5] J. URRICELQUI, M.A. SOTO, and L. THÉVENAZ, "Sources of noise in Brillouin optical time-domain analyzers." *International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS24)*, 963434-963434-4 (2015).
- [6] A. MINARDO, R. BERNINI, and L. ZENI, "Analysis of SNR penalty in Brillouin optical time-domain analysis sensors induced by laser source phase noise," *Journal of Optics*, 18(2), 025601 (2015).
- [7] J. LIU, J. YAO, and T.H. YEAP, "Single longitudinal mode multi-wavelength fiber ring lasers." *Optical Fiber Communication Conference*, (2004).